

Ограничители пускового тока для бортовых систем электропитания

Анатолий Миронов (maapwr@rambler.ru), Сергей Шендяпин

В статье описываются структуры и параметры ограничителей пускового тока для систем вторичного электропитания автономных объектов, рассматриваются вопросы повышения надёжности при увеличении мощности, расширения функциональных возможностей.

Ограничители пускового тока (ОПТ) широко применяются для построения систем электропитания бортовой РЭА, первичный источник электропитания которых ограничен по мощности и не допускает бросков тока. К таковым относятся, например, системы вторичного электропитания (СВЭП) космических аппаратов, первичный источник питания которых (аккумуляторная батарея) имеет ограниченные энергоресурсы. Обычно ОПТ включается на входе СВЭП, ограничивая зарядный ток конденсаторов входных фильтров всей группы модулей электропитания и защищая контакты силового коммутатора, коммутационный ресурс которых невелик.

На рисунке 1 приведена функциональная схема ОПТ с «минусовой» общей шиной, регулирующий элемент (РЭ) которого работает в режиме непрерывного регулирования [1]. Обозначим эту структуру как ОПТ1. Он содержит регулирующий элемент РЭ, резисторный датчик тока $R_{ДТ}$, источник опорного напряжения $U_{ОП}$ и регулирующий усилитель У.

Максимальное значение тока ОПТ1 $I_{ОПТ,МАКС}$ устанавливается номиналом резистора-датчика тока $R_{ДТ}$: $I_{ОПТ,МАКС} = U_{ОП} / R_{ДТ}$.

Выходной конденсатор С не обязателен. Он имеет небольшую ёмкость и

играет роль корректирующего. Тогда при токе регулирующего элемента РЭ $I_{РЭ} < I_{РЭ,МАКС}$ сигнал на выходе усилителя У максимален и регулирующий элемент РЭ открыт. При увеличении тока нагрузки до значения $I_{РЭ,МАКС}$ сигнал на выходе усилителя У уменьшается, переводя регулирующий элемент РЭ в линейный режим и ограничивая тем самым ток через него и в нагрузке значением $I_{РЭ,МАКС}$. Установившееся значение выходного напряжения ОПТ при этом $U_{ВЫХ} = R_H \times I_{РЭ,МАКС}$, где R_H – эквивалентное активное сопротивление нагрузки. На РЭ в этом режиме выделяется мощность $P_{РЭ} = (U_{ВХ} - U_{ВЫХ}) \times I_{РЭ,МАКС}$, а при коротком замыкании на выходе – $P_{РЭ,МАКС} = U_{ВХ} \times I_{РЭ,МАКС}$.

Недостатком рассмотренного ОПТ является увеличенная мощность, выделяемая на РЭ во время запуска СВЭП или коротком замыкании на его выходе, что влечёт за собой перегрев регулирующего элемента и ограничивает время действия перегрузки на уровне сотен микросекунд – единиц миллисекунд. Поэтому ОПТ с непрерывным режимом регулирования РЭ применяется только при малых токах нагрузки (до 1...2 А). Но даже в этом случае необходимо предусмотреть ограничение длительности перегрузки РЭ во время КЗ в нагрузке. Например, включить в

состав ОПТ специальный таймер, принудительно выключающий РЭ по истечении указанного времени (на рис. 1 не показан).

Другой путь решения этой проблемы – перевод РЭ при перегрузке в импульсный режим работы. В [2] приведена электрическая схема одного из вариантов ОПТ с «импульсным» алгоритмом работы РЭ. На рисунке 2 показана его функциональная схема. Назовём эту структуру ОПТ2.

Усилитель У измеряет ток с помощью резистора-датчика тока $R_{ДТ}$ в «минусовой» шине питания и управляет работой регулирующего элемента РЭ. Драйвер Др преобразует выходной сигнал У в управляющее напряжение $U_{У,РЭ}$ формата, требуемого для быстрого открывания и запираания РЭ. Для устойчивой работы ОПТ в режиме переключения РЭ усилитель У охвачен положительной обратной связью на резисторах R1R2.

В установившемся режиме работы ОПТ2 справедливо соотношение: $I_H = I_L = I_{ДТ}$, на выходе У напряжение близко к нулю: $U_{У,ВКЛ} \approx 0$, на выходе драйвера Др – напряжение $U_{РЭ,ВКЛ}$, обеспечивающее открытое состояние РЭ. Рабочий ток протекает от источника входного напряжения через открытый РЭ, дроссель L, нагрузку и резистор-датчик тока $R_{ДТ}$. На рисунке 3 показаны эпюры сигналов во время включения ОПТ при запуске на активно-ёмкостную нагрузку.

При включении ОПТ, когда происходит зарядка конденсатора С и конденсаторов входных фильтров, подключённых на выход ОПТ модулей

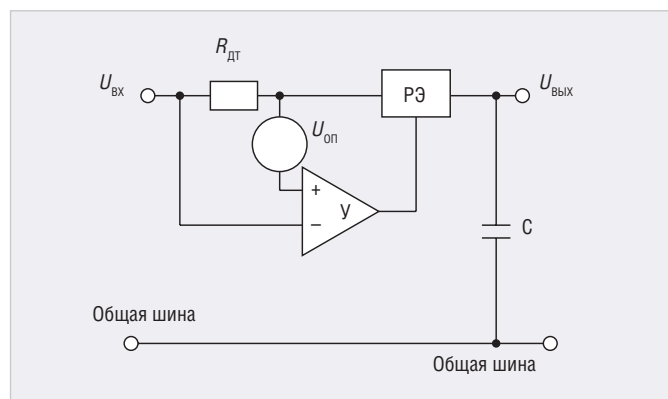


Рис. 1. Функциональная схема ОПТ1 с РЭ непрерывного регулирования

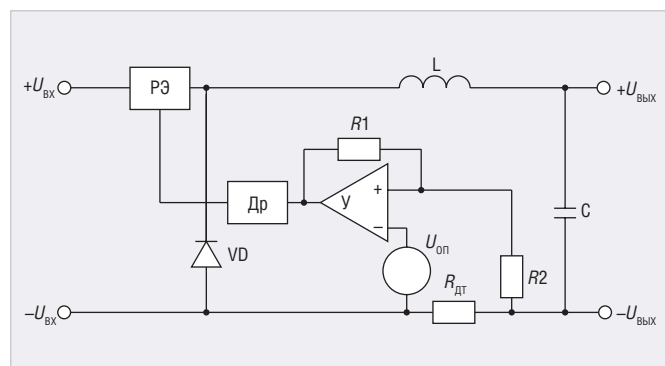


Рис. 2. Функциональная схема ОПТ2 с импульсным режимом работы РЭ при перегрузках

питания СВЭП, ток нагрузки увеличивается, и при напряжении на датчике тока $U_{\text{ДТ.ВЫКЛ}} = U_{\text{ОП}} \times (1 + R_1/R_2)$ на выходе У скачкообразно устанавливается напряжение $U_{\text{У.ВЫХ}}$ на выходе драйвера Др – 0 и РЭ закрывается. Это выражение справедливо при условии, когда $R_1, R_2 \gg R_{\text{ДТ}}$ что легко выполнить во всех практических реализациях ОПТ. Ток в дросселе L начинает уменьшаться, протекая теперь через замыкающий диод VD, нагрузку и датчик тока $R_{\text{ДТ}}$. При напряжении на $R_{\text{ДТ}}$ $U_{\text{ДТ.ВКЛ}} = U_{\text{ОП}} \times (1 + R_2/R_1) - U_{\text{У.ВЫХ}} \times R_2/R_1$ напряжение на выходе У вновь устанавливается на уровне 0, на выходе Др – напряжение $U_{\text{РЭ.ВКЛ}}$ РЭ вновь открывается и процесс повторяется. Таким образом резисторами R_1, R_2 реализован гистерезис $\Delta U_{\text{ДТ}} = U_{\text{ДТ.ВКЛ}} - U_{\text{ДТ.ВЫКЛ}} = U_{\text{У.ВЫХ}} \times R_2/R_1$. От выражений напряжения переключения $U_{\text{ДТ.ВКЛ}}, U_{\text{ДТ.ВЫКЛ}}$ через $R_{\text{ДТ}}$ просто перейти к соответствующим значениям токов $I_{\text{ДТ.ВКЛ}}$ и $I_{\text{ДТ.ВЫКЛ}}$.

С каждым периодом работы напряжение на выходе ОПТ увеличивается до тех пор, пока на очередном периоде работы ток $I_{\text{ДТ}}$ уже не достигает значения $I_{\text{ДТ.ВЫКЛ}}$. РЭ остаётся открытым и процесс включения заканчивается. ОПТ на этапе запуска работает как импульсный преобразователь релейного типа, у которого меняется как длительность открытого состояния РЭ, так и длительность его закрытого состояния. Такой алгоритм включения обеспечивает минимальное время переходного процесса нарастания выходного напряжения ОПТ при фиксированном потребляемом токе среди всех других импульсных способов управления РЭ (ШИМ, ЧИМ).

РЭ в режиме перегрузки или запуска работает в импульсном режиме. Мощность, выделяющаяся на нём, многократно меньше аналогичного показателя структуры ОПТ1, поэтому длительность перегрузки значения не имеет. Он, фактически, теперь является не ограничителем пускового тока, а просто ограничителем тока (ОТ), защищая узлы СВЭП во всех режимах работы, а не только при запуске. Так, например, при выходе из строя одного из модулей питания СВЭП ОПТ2 ограничивает потребляемый ток им и защищает его от полного разрушения. Кроме того, в установившемся режиме LC-элементы устройства работают как помехоподавляющий фильтр с эффективным диапазоном фильтрации до нескольких десятков МГц.

В установившемся режиме суммарное падение напряжения на открытом РЭ, L и ДТ практически не отли-

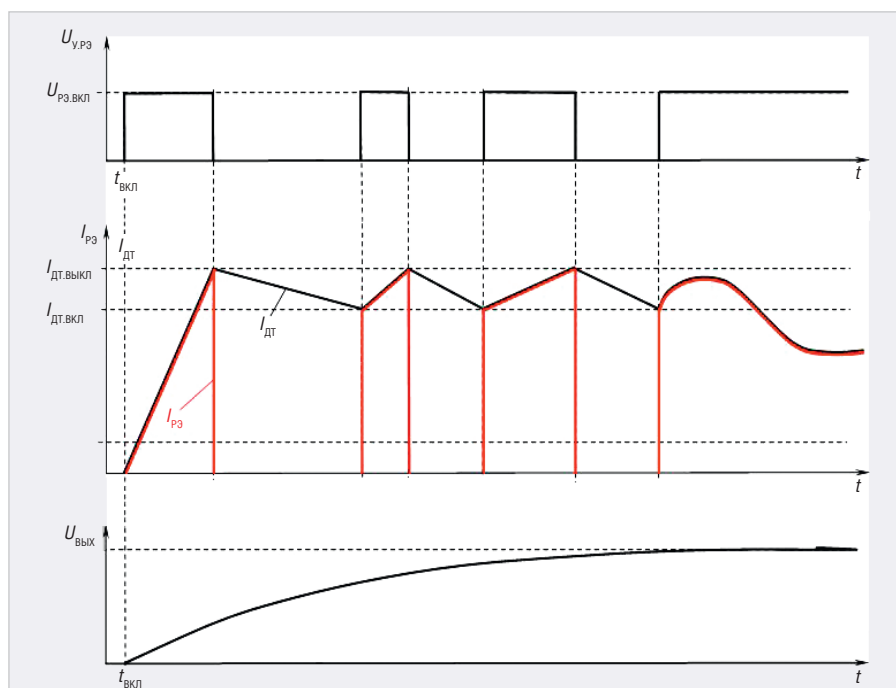


Рис. 3. Эпюры сигналов ОПТ2 при запуске на активно-ёмкостную нагрузку

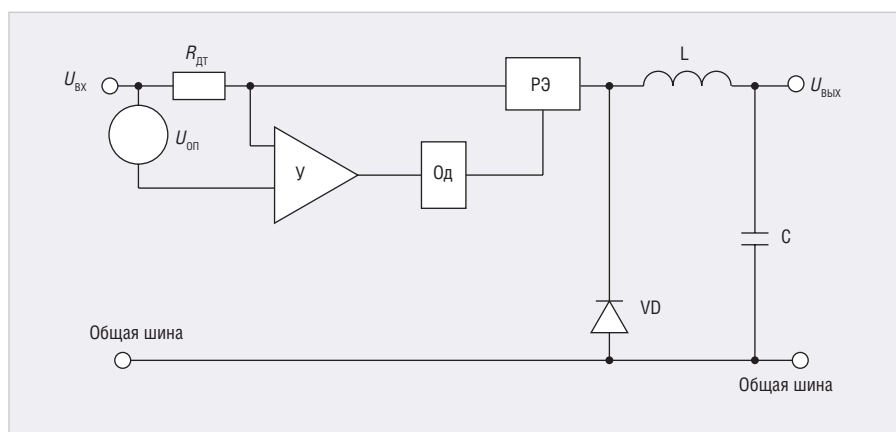


Рис. 4. Функциональная схема ОПТ3 с общей шиной и импульсным режимом работы РЭ

чается от аналогичного параметра ОПТ1 и составляет для современных элементов доли вольта. Кроме того необходимо учитывать, что нагрузка должна выбираться на максимальное значение среднего выходного тока $I_{\text{ВЫХ.МАКС}} = (I_{\text{ДТ.ВКЛ}} + I_{\text{ДТ.ВЫКЛ}})/2$, хотя в импульсный режим ОПТ2 переходит при значении тока $I_{\text{ДТ.ВЫКЛ}} > I_{\text{ВЫХ.МАКС}}$.

Особенностью рассмотренного ОПТ является отсутствие общего для входа и выхода провода, что ограничивает его функциональные возможности и сужает область применения.

Этот недостаток устранён в ОПТ, функциональная схема которого показана на рисунке 4 [3]. Здесь, кроме перечисленных выше узлов, в состав ОПТ включён одновибратор Од. Назовём эту структуру ОПТ3.

Максимальное значение тока через регулирующий элемент РЭ и $R_{\text{ДТ}}$ уста-

навливается также, как и в ОПТ2. В установившемся режиме работы при токе регулирующего элемента РЭ $I_{\text{РЭ}} < I_{\text{РЭ.МАКС}}$ сигнал на выходе усилителя У максимален. Одновибратором Од он дискриминируется как логическая единица и на его выходе удерживается сигнал логического нуля. При этом РЭ открыт. При увеличении тока через него до значения $I_{\text{РЭ.МАКС}}$ сигнал на выходе усилителя У уменьшается. Когда его значение достигнет уровня логического нуля, одновибратор Од запускается. Напряжение на его выходе скачкообразно устанавливается на уровне логической единицы и удерживается в этом состоянии в течение времени задержки $t_{\text{ЗДР}}$, запирая РЭ на указанное время. Таким способом в ОПТ3 формируется пауза в работе РЭ, за время которой ток в дросселе L уменьшается. По окончании паузы усилитель У и одновибратор

Таблица 1. Основные характеристики ВВФ ОПТ серии МДО

Характеристики	Значение
Диапазон входных напряжений, В	17...36, 82...154
Диапазон температур окружающей среды, °С	–60...+105
Диапазон давлений окружающей среды, мм рт. ст.	10 ^{–6} ...1500
Механический удар одиночного действия, g	1000
Механический удар многократного действия, g	150
Линейное ускорение, g	115
Повышенная относительная влажность воздуха при температуре окружающей среды +35°С, %	98...100

Примечание: ОПТ на сеть 82...154 В разрабатываются только на рабочие токи 1 и 3 А.

Таблица 2. Основные характеристики унифицированных модулей ОПТ серии МДО

Обозначение модуля	Номинальный рабочий ток, А	Максимальный импульсный входной ток, А	Максимальное падение напряжения, не более, мВ	Габариты корпуса без фланцев, мм	Масса, г
МДО1	1	2	300	30×20×10	20
МДО3	3	5	300	40×30×10	35
МДО5	5	8	300	48×33×10	45
МДО10	10	16	300	58×40×10	65
МДО20	20	32	400	73×53×13	100

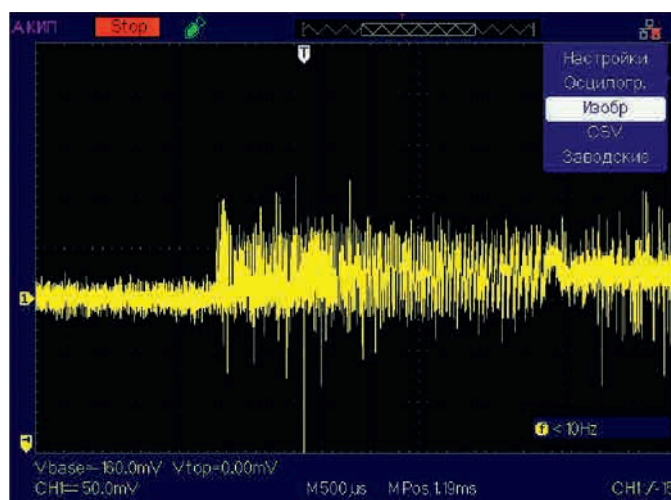


Рис. 5. Осциллограмма входного тока ОПТ серии МДО5 при включении на активно-ёмкостную нагрузку

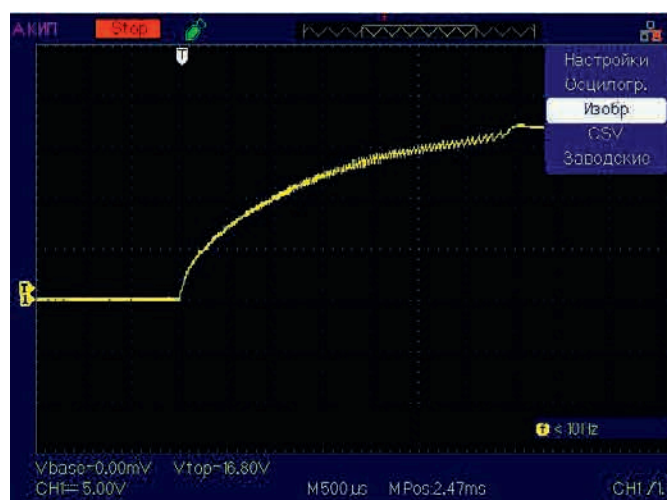


Рис. 6. Осциллограмма выходного напряжения ОПТ серии МДО5 при включении на активно-ёмкостную нагрузку

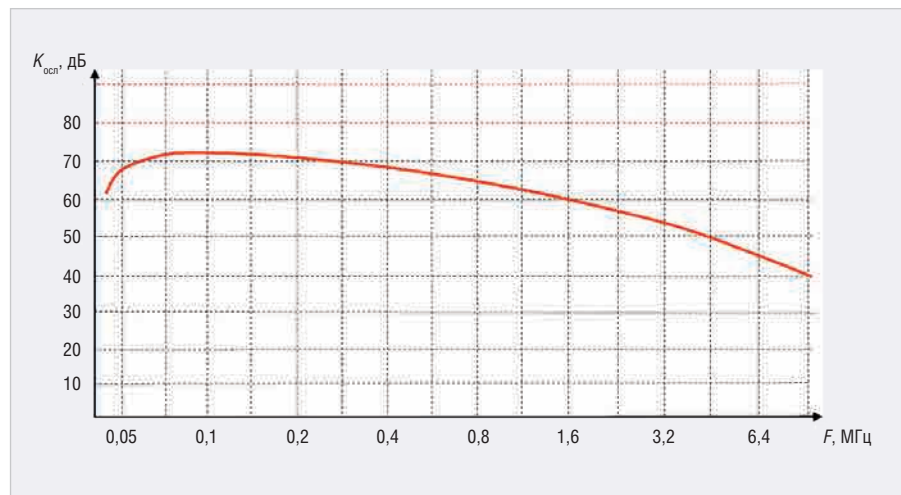


Рис. 7. Частотная зависимость коэффициента ослабления ОПТ серии МДО5

Од возвращаются в исходное состояние, РЭ открывается и ток в через РЭ, L и C вновь начинает увеличиваться. В итоге при перегрузке по току на выходе ОПТ3, аналогично ОПТ2, переходит в импульсный режим работы, ограничивая максимальное значение тока через РЭ и нагрузку на уровне $I_{РЭ,МАКС}$. При этом РЭ также работает в режиме переключения с минимальной рассеиваемой на нём мощностью.

После окончания переходного процесса заряда выходного конденсатора

С параметры структур ОПТ2 и ОПТ3 по постоянному току практически эквивалентны. Все преимущества структуры ОПТ2 являются таковыми и для структуры ОПТ3. Относительно небольшая мощность рассеивания на РЭ во время запуска и перегрузки позволяет проектировать на основе этих структур ОПТ на токи в десятки ампер. Существуют и другие способы реализации импульсного режима работы РЭ на этапе запуска и перегрузки [4].

На основе проведённых исследований ООО «АЭИЭП» разрабатывает унифици-

рованную линейку модулей ОПТ серии МДО, основные характеристики внешних воздействующих факторов (ВВФ) для которых перечислены в таблице 1.

Массогабаритные и основные электрические характеристики линейки ОПТ приведены в таблице 2.

Модули ОПТ имеют общую отрицательную шину, реализуют возможность управления включением с помощью маломощного сигнала логического характера. На рисунке 5 показана осциллограмма входного тока при запуске ОПТ на активно-ёмкостную нагрузку. Т.к. «полезное» напряжение на датчике тока составляет порядка 40 мВ, в осциллограмме видны помехи, возникающие в схеме в момент переключения силовых элементов, практически такой же амплитуды, как и полезный сигнал. На рисунке 6 показана осциллограмма выходного напряжения при запуске. Очевидно, что при такой относительно небольшой скорости нарастания напряжения на выходе ОПТ, т.е. на входе ёмкостных фильтров нагруженных на ОПТ преобразователей, их зарядные токи невелики, что положительно сказывается на надёжности последних. На осциллограмме хорошо видно, как после заряда ёмко-

стей нагрузки ОПТ переходит в непрерывный режим работы.

В установившемся режиме ОПТ импульсного типа работают как помехоподавляющий фильтр с эффективной полосой подавления до нескольких десятков МГц. Максимальное ослабление вплоть до 70 дБ ОПТ реализует как раз в зоне действия первых, самых мощных гармоник силовых преобразователей. Сглаженная частотная зависимость коэффициента ослабления ОПТ МДО5 показана на рисунке 7.

Вопросы стойкости устройства к специальным воздействиям решаются выбором соответствующей элементной базы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Миронов А.А.* Некоторые проблемы разработки ограничителей пускового тока. Обзор по материалам отечественной и зарубежной патентной информации за 1972–1989 гг. Центр научно-технической информации «Поиск». Выпуск 42, 1990 г., с. 5 (рис. 2).

2. *Миронов А.А.* Некоторые проблемы разработки ограничителей пускового тока. Обзор по материалам отечественной и зарубежной патентной информации за 1972–1989 гг. Центр научно-технической информации «Поиск». Выпуск 42, 1990 г., с. 13 (рис. 8).

3. *Миронов А.А.* Ограничитель тока. Патент РФ на полезную модель № 46593. 2005 г.

4. *Миронов А.А.* Ограничитель тока. Патент РФ на полезную модель № 182804. 2018 г.



НОВОСТИ МИРА

VIII ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ЭКБ-2019» УСПЕШНО ЗАВЕРШИЛА СВОЮ РАБОТУ

15–16 августа 2019 года в Москве прошла VIII Всероссийская научно-техническая конференция ЭКБ на тему «Обеспечение предприятий промышленности электронной компонентной базой. Диверсификация поставок в рамках импортозамещения».

Традиционно организатором мероприятия выступила компания «Тестприбор» при поддержке ФГУП «МНИИРИП», АО «Российская электроника» и Координационного совета разработчиков и производителей РЭК, ЭКБ и продукции машиностроения.

Тематика конференции охватила широкий спектр проблем производства и поставок качественной ЭКБ, выявления контрафактной продукции при поставках элементной базы как гражданского, так и специального назначения, а также вопросы проведения испытаний и хранения ЭКБ.

Открыли работу конференции соорганизаторы мероприятия. Директор ФГУП «МНИИРИП» П.П. Куцко выступил с докладом о торгово-информационной площадке «ЭКБ Маркет», представляющей собой инструмент обеспечения промышленности электронной компонентной базой двойного и гражданского назначения. Председатель Координационного совета разработчиков и производителей РЭА, ЭКБ и продукции машиностроения А.В. Брыкин рассказал участникам о нормативно-правовых инициативах по устранению недобросовестных практик при осуществлении закупок радиоэлектронной продукции гражданского назначения. Выступление директора по НТР и инновациям АО «Российская электроника» В.М. Исаева было посвящено организации работ по развитию и применению ЭКБ в радиоэлектронном комплексе ГК «Ростех».

В большом количестве докладов были затронуты вопросы защиты ЭКБ от воздей-



ствия радиационного излучения и проведения испытаний на радиационную стойкость. О проблемах и возможностях в данной области говорили представители НИИЯФ МГУ им. Ломоносова (заведующий лабораторией Д.М. Подорожный), ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению» (заведующий лабораторией С.Б. Ластовский), НИЯУ МИФИ (ведущий научный сотрудник А.В. Уланова), ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН (заместитель директора Ю.Г. Малофеев) и АО «НИИП» (начальник управления радиационных испытаний А.И. Озеров).

Представители АО «Тестприбор» (А.Ю. Максимов, начальник конструкторского бюро, и Л.Ю. Федорович, инженер-технолог гальванического производства) представили доклады о возможностях производства корпусной продукции для микроэлектроники и изделий из керамики на основе оксида алюминия, нитрида алюминия и оксида бериллия, а также рассказали о технологии нанесения металлизации, химических и гальванических покрытий, освоенной на производстве компании «Тестприбор» в Великом Новгороде.

Большой интерес вызвал доклад директора департамента науки СПбГЭТУ «ЛЭТИ» В.В. Лучинина об отечественной креативной технологии в алмазной электронике

для создания нового поколения приборов на основе карбида кремния и алмаза, включавший демонстрацию образцов алмазной продукции.

Актуальные вопросы и проблемы импортозамещения были освещены в докладах представителей АО «ГосМКБ «Вымпел им. И.И. Топорова», АО «Российские космические системы», АО «Ресурс» и ООО «Кей-сайт Текнолоджиз».

О возможностях разработки, производства и проведения испытаний ЭКБ рассказали представители АО «Тестприбор», филиала АО «ОРКК» – «НИИ КП», АО «Группа Кремний Эл», АО «Биметалл» и АО «Российские космические системы».

За два дня работы конференции участники заслушали 25 докладов, обсудили актуальные вопросы производства и применения ЭКБ, проведения испытаний и хранения элементной базы.

В конференции приняли участие более 100 представителей 60 предприятий радиоэлектронной промышленности России и ближнего зарубежья.

IX Всероссийская научно-техническая конференция «ЭКБ-2020» состоится в III квартале 2020 года.

www.test-expert.ru